

玄武岩纤维加固震损三维混凝土框架节点抗震试验

余江滔¹, 苏磊², 陆洲导¹, 张克纯³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;
3. 无锡高铁站商务区建设局, 江苏 无锡 214105)

摘要: 通过5组三维混凝土框架节点试验, 研究玄武岩纤维加固后节点的抗震性能. 分别进行了模拟地震的预损伤试验、构件加固和加固后的低周反复试验, 探讨不同损伤程度、不同裂缝处理方法对三维框架节点抗震性能的影响. 通过对节点的滞回 & 骨架曲线、延性系数、承载力及刚度退化等参数分析可知: 玄武岩纤维加固对提高节点承载力作用有限, 但对提高抗震性能效果明显, 节点的抗震性能恢复并超过了受损前, 加固后节点由“弱柱强梁”转变成了“强柱弱梁”的破坏形式, 说明该加固方法是合理而有效的.

关键词: 地震损伤; 抗震性能; 三维框架节点; 玄武岩纤维; 损伤修复

中图分类号: TU 375.4

文献标识码: A

Experimental Study on BFRP-reinforced Pre-damaged Concrete Beam-Column Joints by Simulated Earthquake

YU Jiangtao¹, SU Lei², LU Zhoudao¹, ZHANG Kechun³

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China; 2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Construction Bureau Business District High Speed Rail Station, Wuxi 214105, China)

Abstract: A total of five repaired beam-column joints (B-CJs) were pre-damaged under cyclic loads in order to study on the seismic behavior. The experimental study including pre-damage, rehabilitation and re-test under cyclic loads concentrated on the effect on different levels of pre-damage and epoxy injection. Through the test data, namely the hysteresis curves, ductility, ultimate strength and stiffness degradation, etc, the following conclusion is drawn that the rehabilitation with basalt fiber sheets has notable influence on

the seismic performance of joints, but ultimate loads limited. The repaired B-CJs can reach or even exceed the level of their original seismic performance before pre-damage. The failure mode of strong beam and weak column is changed into strong column and weak beam after rehabilitations. The proper method is used in need for strengthening the damaged joints.

Key words: seismic damage; seismic performance; 3D beam-column joint; basalt fiber reinforced polymer; rehabilitation of damage

“5·12”汶川地震是我国建国以来最为强烈的地震之一^[1]. 在震害现象中, 钢筋混凝土框架结构很少出现规范^[2]所要求的“强柱弱梁”破坏机制. 国内外大量的研究表明^[3-10], 地震作用下, 框架结构的变形能力与其破坏机制密切相关. 与局部型结构屈服机制的“弱柱强梁”相比, “强柱弱梁”的屈服机制属于整体型结构屈服机制, 具有较大的抗震鲁棒性, 可使整个结构有更好的内力重分布能力, 使更多结构构件参与整体结构抗震, 是结构概念设计所期望的屈服机制.

试验室大多进行二维十字节点的低周试验, 试验中往往大量地出现节点核心区斜交叉裂缝^[11-14]. 实际上三维现浇框架的正交方向梁会约束节点核心区, 节点破坏形式与二维节点有所不同, 震害灾区的调研已经多次证明这一点. 因此, 本文拟采用三维正交框架节点作为试件. 此外, 实际地震中出现“强梁弱柱”的主要原因之一是现浇楼板的作用. 现浇板及板内钢筋会使框架梁实际抗弯承载力增大20%~30%, 极端情况下甚至会增大1倍以上. 为了贴近实际情况, 本文采用的试件均带有现浇板.

收稿日期: 2009-09-14

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE09-D-02); 国家自然科学基金(50778134); 高等学校博士学科点专项科研基金(200802471089)

第一作者: 余江滔(1975—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火与加固性能. E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

通讯作者: 陆洲导(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构加固. E-mail: luzhoudao@163.com

为改善混凝土结构抗震性能,广大研究者一直在寻求不同的加固材料,黏贴钢板、纤维复合材料(FRP)分别在不同时期得到了认同^[15-18],后者以其轻质、高强、抗腐蚀及施工方便等特点表现出更为独特的优势,但也存在一定缺陷,例如碳纤维价格较高,玻璃纤维强度和化学稳定性较差,制约了其推广应用.玄武岩纤维具有强度高、抗冲击、热稳定性好、防火性优良、耐腐蚀等优点,得到国内外一些学者的认同.相比碳纤维材料,玄武岩纤维的力学性能虽然逊色一些,但市场价格仅为碳纤维的1/3左右,且已完全实现国产化,是一种比较适合地震后大面积加固的材料.然而,玄武岩纤维进行结构震损加固的效果并没有得到系统的研究.

综上所述,本文拟进行带现浇板的三维框架节点的模拟地震预损伤、震损构件的加固和加固后的低周反复破坏试验,研究玄武岩纤维加固不同损伤程度节点的承载力、极限位移、延性系数、材料应变,探讨玄武岩纤维加固震损节点后的抗震性能,研究其是否满足“强柱弱梁”的屈服机制,并对现行震损结构加固设计方法提出建议.

1 试验概况

1.1 试验设计和特点

本试验过程如下:①试件采用三维带楼板的框架节点.②除对比试件外,对节点进行不同程度低周反复加载以模拟不同程度的地震预损伤.③采用环

氧树脂浆进行的裂缝修补.④对对比构件和震损加固构件进行等幅、变幅的低周反复试验,直到构件的承载力下降至最大值的85%以下.

为了与本课题组曾经进行过的碳纤维加固震损节点试验形成对比^[18],本次试验共设计5个完全相同试件,编号为J-0—J-4.试件采用与文献^[18]相同标号的混凝土强度等级、构件截面尺寸和配筋形式,如图1所示.唯一的区别为平面外增设正交梁,垂直于平面内的框架梁截面尺寸为150 mm×250 mm,梁和柱的长度取反弯点之间的距离,形成三维节点.玄武岩纤维布抗拉强度为3 200 MPa,弹性模量为90 GPa,延伸率为2.7.混凝土的棱柱体抗压强度为24 MPa,弹性模量为26 000 MPa,所有试件同批次浇筑.

1.2 试验加载制度

节点J-1—J-4采用的玄武岩纤维加固方式和加固量均相同,如图2所示.本文研究不同震损程度和灌缝对于构件加固效果的影响,如表1所示.加固方法的细节如下:①在靠近节点柱高300 mm范围内的部位沿柱纵筋方向黏贴两层L型玄武岩纤维,此玄武岩纤维另一端黏贴于主梁或正交梁端靠近节点500 mm或300 mm范围内梁纵筋方向的梁底和板顶,在柱高300 mm范围内环向包裹两层玄武岩纤维.②在主梁端500 mm和正交梁端300 mm范围内黏贴条带式U型箍,所有U型箍在板底锚固200 mm.③节点核心区凸角黏贴L型玄武岩纤维,并延伸至梁侧.

表1 节点的加载制度和加固方法

Tab.1 Loading regime and strengthened scheme of the B-CJ

试件编号	轴压比	预损位移/mm	是否灌缝	加固方式	0.85 P_{max} 位移/mm
J-0	0.5	不预损	否	不加固	90
J-1	0.5	33	是	BFRP	130
J-2	0.5	26	是	BFRP	134
J-3	0.5	26	否	BFRP	134
J-4	0.5	不预损	否	BFRP	120

注:0.85 P_{max} 位移是当荷载降到承载力85%时的位移.构件J-4由于后期加载时试验架轴承松动导致数据异常,故只加载到132 mm.

试验中试件竖向荷载一次性施加,在试验中保持恒定.柱端加载竖向轴力为200 kN,保持轴压比0.5左右(尽量模拟框架中、下层的柱轴力).水平荷载的施加采用力和位移双重控制方法.在钢筋屈服前采用力控制,每一荷载步进行2个循环的往复.主筋屈服后采用位移控制,位移采用等幅变幅加载,每级等幅循环3次,然后增大加载点位移量进行下一步加载.

J-0作为对比试件,不加固直接加载至破坏;

J1—J3先进行低周反复试验,模拟地震作用形成预损,然后用玄武岩纤维修复加固后直接试验至破坏,修复后试件编号为J-1,J-2,J-3.本试验中另有一个对比试件J-4,不进行预损试验,加固后直接试验至破坏.试验中由固定于反力墙上的水平电液伺服往复作动器对试验架顶部施加低周反复水平荷载,则几何可变的试验架带动安装在框架内的试件一起变形,以实现模拟试件实际受力要求.

1.3 试验测点布置和测试内容

根据申克作动器记录的荷载、位移值来绘制水平荷载-变形曲线;通过梁端和柱端设置位移测量塑性铰区段的曲率以及节点转角;用电阻应变片测量梁、柱端纵筋应力和节点核心区箍筋应力;在试验过程中实时记录并描绘裂缝开展情况.试验过程中预损位移的判断以钢筋的屈服程度为判定标准.

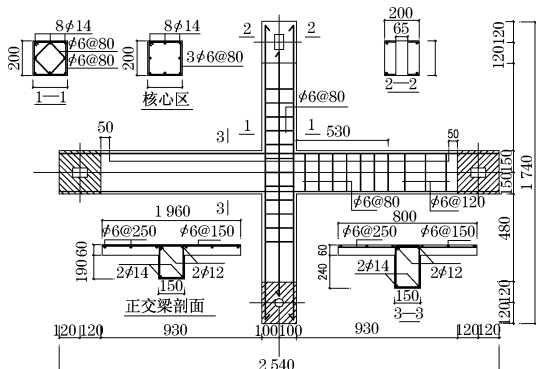


图 1 节点主方向布置(单位:mm)

Fig.1 Details of the BJ-C in the major direction(unit:mm)

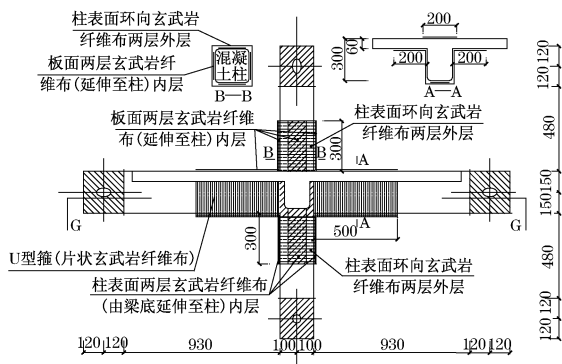


图 2 节点玄武岩纤维加固图(单位:mm)

Fig.2 Details of the BJ-C in the major direction(unit:mm)

2 试验结果

2.1 一般现象

2.1.1 未受损、未加固试件 J-0 的试验现象

J-0 试件不经加固直接加载至破坏.柱顶位移达到 24 mm 时主梁底与柱交接处开裂,正交梁底与柱交接处开裂;位移 36 mm 时板沿正交梁边出现贯穿性裂缝.板面与柱交界处混凝土开始变得疏松、剥落,梁下部柱角开裂,出现横向裂缝;48 mm 时柱下角部混凝土持续剥落.板在 4 个角部沿正交梁边均出现贯穿性裂缝;60 mm 时柱角部裂缝连成一片.主梁底部与柱交界处混凝土压碎,露出骨料;84 mm 时上、下柱角部混凝土剥落,柱纵筋外露,柱根箍筋外

露;90 mm 时节点承载力明显下降,试验终止.试验现象判断 J-0 构件破坏形态为柱端弯曲破坏和核心区剪切破坏共同发生.

2.1.2 不同预损后玄武岩纤维加固试件 J-1—J-4 的试验现象

不灌缝的 J-1—J-3 达到预损位移, J-4 位移达 33 mm 时,纵向钢筋屈服.4 个构件进行玄武岩纤维加固后宏观试验现象类似,以 J-1 的试验现象为例进行描述.柱端水平荷载加载至 30 kN 时,胶体薄弱部位拉裂,发出零星脆裂声;进行位移控制后,位移达 24 mm 时,节点区纤维内有脆裂声,板底沿正交梁方向出现裂缝;36 mm 时节点脆裂声变得较密集和剧烈,板裂缝贯穿板面;60 mm 时主梁底和柱交界处出现裂缝,部分纤维被撕裂,上柱角出现裂缝;96 mm 时主梁顶部分纤维鼓起,脱离混凝土表面,正交梁底柱侧纤维 U 形箍断裂,柱四周混凝土鼓起,局部混凝土碎裂;108 mm 时,混凝土发出很大爆裂声,梁端面出现扭转裂缝;位移 120 mm 时,核心区处混凝土酥松剥落严重,试验停止.试验后撕开纤维发现:柱根处混凝土碎裂,主梁同节点有脱离迹象,判断构件破坏形态为梁端发生弯曲破坏,典型破坏形态如图 3 所示.

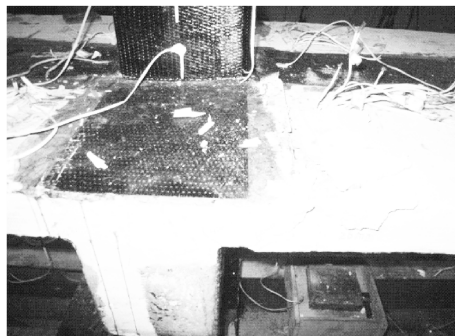


图 3 试件 J-1—J-4 典型破坏形态

Fig.3 Failure of J-1—J-4

2.1.3 楼板的影响

从试验现象可知几乎所有节点加载中,位移达到 36 mm 时板即开裂.随着位移增大,板裂缝数量增加并很快贯通.在所有裂缝中,板裂缝宽度最大,说明楼板钢筋的利用程度非常高,楼板所起作用是不可忽视的.板钢筋进入强化阶段后,对节点受拉约束增强.说明楼板确是“强梁弱柱”主要原因之一.

2.2 主要试验结果

各试件柱端加载极限位移和极限荷载如表 2 所示.根据试验结果,各个试件荷载-位移滞回 & 骨架曲线如图 4—8 所示.玄武岩纤维加固构件承载力降低系数和环比刚度曲线如图 9,10 所示.

表2 各试件柱端加载极限位移和极限荷载
Tab.2 Ultimate displacement and load on the column

构件名称	承载力/kN	承载力相对J-0提高程度/%	$0.85P_{\max}$ 位移/mm	$0.85P_{\max}$ 位移相对J-0提高程度/%	位移延性系数
J-0	71.4		90		2.60
J-1	75.8	6.2	130	66.5	4.06
J-2	76.3	6.9	134	71.6	4.62
J-3	76.2	1.7	134	71.6	4.45
J-4	79.6	11.5	120	53.6	3.64

注:位移延性系数是构件延性的宏观反应,采用极限变形和初始屈服变形的比值来评价结构在承受大的变形而承载力无显著降低的性质。

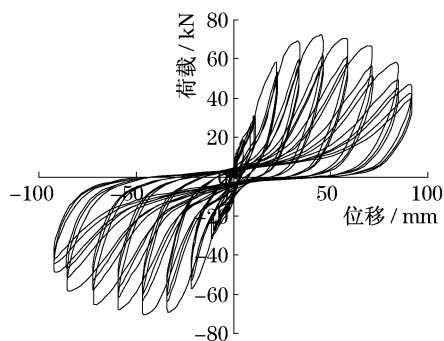


图4 J-0 滞回 & 骨架曲线

Fig.4 Hysteresis and skeleton curves of J-0

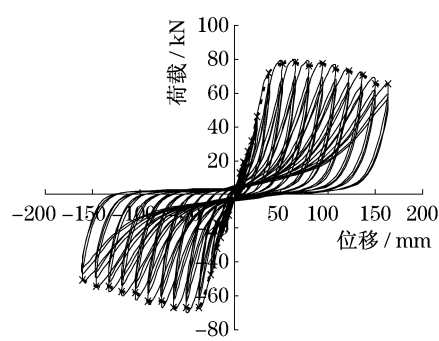


图7 J-3 滞回 & 骨架曲线

Fig.7 Hysteresis and skeleton curves of J-3

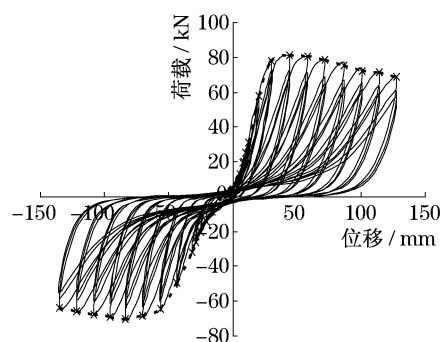


图5 J-1 滞回 & 骨架曲线

Fig.5 Hysteresis and skeleton curves of J-1

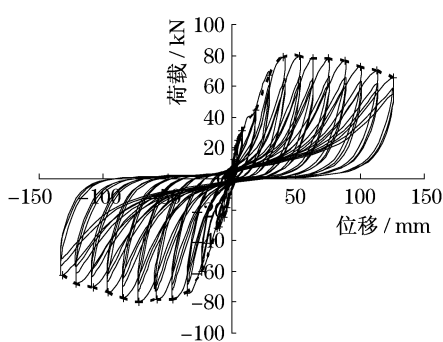


图8 J-4 滞回 & 骨架曲线

Fig.8 Hysteresis and skeleton curves of J-4

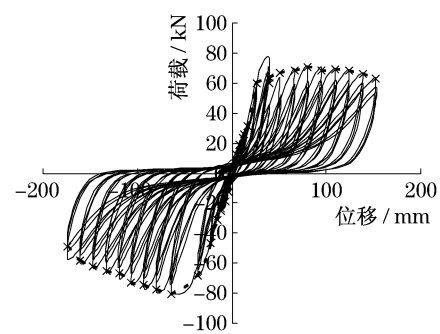


图6 J-2 滞回 & 骨架曲线

Fig.6 Hysteresis and skeleton curves of J-2

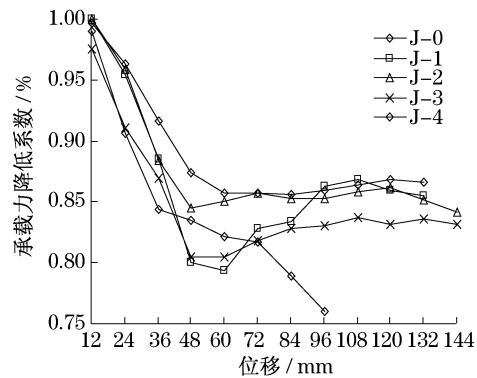


图9 玄武岩纤维加固构件承载力降低系数

Fig.9 Degradation factor of B-CJs' strength (BFS)

3 参数分析

3.1 极限位移和极限荷载分析

从表2 实测数据可以看出:① 对比J-0 和J-4, 发现用玄武岩纤维加固后节点承载力提高有限, 提高幅度最大值约 11.5%, 但极限位移提高显著, 提高

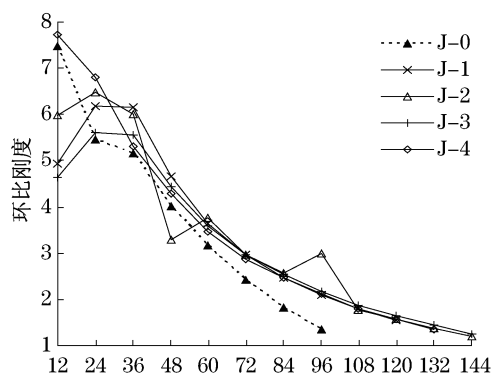


图10 玄武岩纤维加固构件环刚度曲线

Fig.10 Degradation factor of B-CJs' stiffness (BFS)

幅度最大值约 71.6%。② 对比 J-1—J-4, 发现预损程度的大小对混凝土构件承载力影响不明显, 但预损越小, 极限位移越大, 加固效果越好。③ 不预损的 J-4 试件的极限位移比预损的略小。地震作用损伤对结构构件的初期破坏影响比较大, 随着时间变长后期影响较小。④ 对比 J-2 和 J-3, 两者的差别仅在于 J-2 进行了灌缝处理而 J-3 未进行灌缝处理, 从表 2 可以看出灌缝处理对于提高节点的极限承载力和位移影响很小。⑤ 未经加固的节点 J-0 延性系数为 2.6, 而 J-1—J-3 加固后节点的延性系数基本上都在 4.0 以上。由此可见, 加固节点的抗震性能有了充分提高。

3.2 滞回 & 骨架曲线分析

由图 4 可以看出, 试件在位移为 8 mm 前保持较好线弹性, 耗能能力很小。在位移为 24 mm 时滞回曲线开始出现“捏拢”现象, 随水平位移增大, 现象愈明显, 这说明节点核心区内梁纵筋受拉屈服后, 因受拉产生的裂缝在反向加载初期未能闭合, 弯矩只能由钢筋内力偶提供, 导致构件刚度下降, 而梁纵筋在节点核心区内黏结退化后, 这一现象更为加剧。裂缝闭合以后, 梁端受压区混凝土参与工作, 试件刚度得到提高, 曲线变得陡峭。同级荷载作用下, 循环次数增加同时构件刚度下降, 且 J-0 的骨架曲线未出现明显的屈服台阶, 表现出脆性破坏的特征, 说明节点破坏形式是柱端弯曲破坏和核心区剪切破坏同时发生, 与试验现象一致。

由图 5—8 可以看出, 试件 J-1—J-4 在位移为 5, 12 和 14 mm 前保持较好线弹性, 在位移为 24, 36 和 48 mm 时滞回曲线开始出现“捏拢”现象, 随水平位移增大, 现象愈明显。位移到 48 mm 或者 60 mm 时, 滞回曲线呈倒 S 形并逐渐向位移轴倾倒, 刚度越来越小。J-1—J-4 当加载至 J-0 的极限荷载左右, 均

出现较明显的屈服台阶, 并且柱端极限位移显著提高(30%~60%), 体现出玄武岩纤维布加固节点良好的延性性能。试验中板先于梁开裂, 原因是梁、柱在灌缝后加固变强, 初始阶段胶体开裂使玄武岩纤维参与受力时间较早。从试验现象来看, 破坏最终试件因梁与节点脱离, 同时柱端混凝土被压碎而丧失承载力, 说明发生了“强柱弱梁”型破坏, 玄武岩纤维加固效果明显。

节点滞回曲线的共同特点是从最初加载时耗能能力较好的梭形很快过渡到耗能能力最差的倒 S 形, 并且“捏拢”现象严重, 这种情况与节点区的钢筋黏结滑移、混凝土的剪切变形以及混凝土的裂缝效应分不开。加固后试件滞回曲线的“捏拢”和“零滑移”现象都比未加固试件有所改善, 滞回环更加饱满, 滞回曲线形状也有所改善, 试件的耗能能力和抗震性能在加固后有明显的改善。

由骨架曲线看出, 加固节点 J-4 相对于 J-0, 荷载增长较快, 刚度提高, 当梁根部玄武岩纤维撕裂, 梁根部出现弯曲裂缝后, 很快扩展形成通缝, 梁纵筋出现屈服, 节点承载力略有下降。加载后期, 由于钢筋滑移并进入强化阶段, 其承载力又进一步提高。观察有预损的节点 J-1—J-3 的骨架曲线, 发现其在加载一段时间以后, 骨架曲线斜率变大, 说明包裹在外的玄武岩纤维参与受力导致其刚度提高。

通过上述分析, 玄武岩纤维加固震损混凝土三维框架节点可以提高其抗震性能, 有效控制柱端压弯破坏、核心区剪切破坏、纵筋搭接接头锚固破坏, 它相当于提供了附加横向配筋, 提高了节点核心区抗剪能力, 从而抑制混凝土的剥落和纵筋的屈曲, 使得柱端和梁端具有很大的非弹性弯曲变形能力, 并提供紧箍力, 阻止纵筋搭接接头的黏结破坏和滑动, 使节点核心区达到理想的梁端受弯的延性破坏。通过试验发现, 试验中在柱上部施加节点的竖向荷载模拟实际结构中柱承受的竖向荷载, 因为外包玄武岩纤维的约束作用可以使混凝土柱的承载能力提高但有限, 这些对于玄武岩纤维提高节点抗震性能没有影响。

3.3 承载力和刚度曲线分析

由图 9 可以看出, 随着柱端位移的不断加大, 各试件节点均发生承载力退化现象。其中, J-0 呈直线下降趋势, 承载力衰减最为严重, 强度退化很明显, 这与其柱端和节点的近似于脆性破坏的特征是一致的。J-1—J-4 在位移达到 36 mm 之前承载力降低很快, 趋势与 J-0 基本一致。其后承载力下降趋势明显

趋缓甚至有所反弹,一般位移在 120 mm 后才缓慢下降,表现出明显的延性破坏特征.这是因为玄武岩纤维提供的是被动约束,只有节点产生较大的变形之后才会充分作用.承载力退化的逆势提高说明加固材料逐渐参与工作,有效地改善了节点在加载后期的承载性能.

从图 10 中可以看出,预损后进行灌缝并进行玄武岩纤维加固能够在一定程度上提高试件刚度,但提高幅度不大.在位移大于 84 mm 的加载后期,J-0 刚度下降很快,而加固节点刚度曲线下陡比较平缓,这就说明玄武岩纤维布加固的一个主要作用是限制节点裂缝开展以及延缓结构刚度的衰减,使得节点能够在更大的变形下保持应有的承载力,从而提高了节点的延性.J-0 初始刚度大于受预损节点,说明虽然对预损构件进行了灌缝处理,但浆体无法达到构件深处的微小裂缝.此时加固材料应变很小,对构件刚度贡献不大,故受预损节点的初始刚度略小.随着位移增大,加固材料贡献增加,故受预损构件刚度均有逆向增大的迹象.随位移进一步增大,节点刚度均下降.总的来说,加固节点刚度衰减幅度较轻.

3.4 玄武岩纤维加固震损混凝土节点机理分析

玄武岩具有强度高、化学稳定性好、延展性好等特点.相比碳纤维,玄武岩纤维的弹性模量较低,所以玄武岩纤维加固受弯构件的效果不如碳纤维明显.但玄武岩纤维的强度与碳纤维接近,延展性则要高于碳纤维^[19],这使得玄武岩纤维在节点的抗震性能的加固效果(尤其是延性)并不逊色于碳纤维.

从试验的受力、破坏过程可知:①核心区黏贴的玄武岩纤维不仅起到了水平抗剪钢筋和垂直抗剪钢筋的作用,还约束了核心区的混凝土,提高了核心区的抗剪能力;柱环向黏贴的玄武岩纤维约束了混凝土的剪切变形,提高了柱的抗剪承载力;梁端纵向玄武岩纤维分担了梁纵筋的应力,降低传入节点的剪力,间接提高了节点的抗剪承载力.②观察玄武岩纤维的应变.初始阶段,外贴玄武岩纤维与被加固混凝土共同工作良好,有效地参与混凝土共同受力,并且逐渐承担弯矩,降低了混凝土及内部钢筋的应力水平.混凝土初开裂时,钢筋及纤维充分发挥了强度高的特点,提高了节点的承载力和刚度(由于外贴纤维量有限,所以不是很明显).③节点在低周反复荷载作用下,裂缝逐渐开展,开裂处纤维的应变大于 0.01.此时,虽然节点钢筋发生滑移,梁、柱、节点核心区的玄武岩纤维开始剥离破坏,节点刚度衰减,但玄武岩纤维延展性好的特点发挥出来,节点的承载

力仍缓慢上升.④混凝土(包括核心区)开裂后,节点钢筋滑移加剧,梁、柱、节点核心区的玄武岩纤维有明显的剥离破坏,承载力开始下降.但在黏贴长度足够的情况下,玄武岩纤维布只是逐渐剥离,只要不发生断裂,节点的延性得到了明显的提高.

4 结论

本文共进行了 5 个三维节点震损修复后的抗震性能试验,包括模拟地震的预损伤试验.构件加固和加固后的低周反复试验,研究采用玄武岩纤维加固不同震损程度、不同裂缝处理方法的三维钢筋混凝土框架节点的抗震性能,可以得出如下结论:

(1) 玄武岩纤维加固后节点的滞回 & 骨架曲线的形状更加理想.从低周反复过程中不同位移值的等幅作用下构件承载力和刚度退化程度来看,加载初期,由于纤维参与受力的程度均低,对节点承载力和刚度贡献较小.位移超过 36 mm 后,经加固节点的承载力和刚度退化程度都明显较未加固节点轻.

(2) 玄武岩纤维加固后节点的承载力和极限位移有所提高.玄武岩纤维加固对于提高节点承载力提高有限,最大幅度约 11.5%,但加固后的节点极限位移提高幅度约 71.6%;灌缝处理对于承载力和极限位移的影响较小.

(3) 玄武岩纤维可以增强震损混凝土框架节点抗震性能.试验结果可以看出,经加固受模拟地震损伤的节点的承载力达到甚至超过了未受损前的水平;其 $0.85P_{\max}$ 位移较未受损构件亦有了大幅度的提高;预损越小,极限位移越大,加固效果越好;从循环往复等幅荷载下的刚度退化、承载力退化和延性系数三个指标来看,震损节点经加固后抗震性能均比未受损节点优良.这说明玄武岩纤维加固对于修补损伤和提高抗震性能非常有效.通过玄武岩纤维加固,节点的最终破坏形式由柱端的弯曲破坏转变为梁、板的弯曲破坏,达到了“强柱弱梁”的要求.

参考文献:

- [1] 叶列平,曲哲,马千里,等.从汶川地震中框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J].建筑结构,2008,38(11):52.
YE Lieping, QU Zhe, MA Qianli, et al. Study on ensuring the strong column-weak beam mechanism for RC frames based on the damage analysis in the Wenchuan earthquake[J]. Building Structure, 2008, 38(11): 52.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范

- [S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
National Standard of the People's Republic of China. GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press,2008.
- [3] 王亚勇.汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J].建筑结构学报,2008,29(4):20.
WANG Yayong. Lessons learnt from building damages in the Wenchuan earthquake-seismic concept design of buildings [J]. Journal of Building Structures,2008,29(4),20.
- [4] 王亚勇.汶川地震建筑震害启示——三水准设防和抗震设计基本要求[J].建筑结构学报,2008,29(4):26.
WANG Yayong. Lessons learnt from building damages in the Wenchuan earthquake—three earthquake performance objectives and basic requirements for seismic design of buildings [J]. Journal of Building Structures,2008,29(4),26.
- [5] 叶列平,程光煜,陆新征,等.论建筑结构抗震的鲁棒性[J].建筑结构,2008,38(6):11.
YE Lieping, CHENG Guangyu, LU Xinzheng, et al. Introduction of robustness for seismic structures [J]. Building Structure, 2008,38(6):11.
- [6] 蒋永生,陈忠范,周绪平,等.整浇梁板的框架节点抗震研究[J].建筑结构学报,1994,12(3):11.
JIANG Yongsheng, CHEN Zhongfan, ZHOU Xuping. et al. Aseismic research on RC frame joint of monolithically casted slab [J]. Journal of Building Structures,1994,12(3),11.
- [7] Ammerman O V, Wolfgram-French C. R/C beam-column-slab subassemblages subjected to lateral loads [J]. Journal of Structural Engineering,1989,115(6):1298.
- [8] Parvin Azadeh, WU Shan hong. Ply angle effect on fiber composite wrapped reinforced concrete beam-column connections under combined axial and cyclic loads [J]. Composite Structures,2008,82(2):532.
- [9] Abhijit Mukherjee, Mangesh Joshi. FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation [J]. Composite Structures,2005,70(9):185.
- [10] Adin M A, Yankelevsky D Z, Farhey D N. Cyclic behavior of epoxy repaired reinforced concrete beam-column joints [J]. Struct J ACI,1993,90(2):170.
- [11] 洪涛.碳纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能试验研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2002.
HONG Tao. A study on performance of injured interior column-beam-slab subassemblies rehabilitated by pasted carbon fiber reinforced plastics [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering,2002.
- [12] 卢亦焱,陈少雄,赵国藩.外包钢与碳纤维布复合加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2005,38(5):10.
LU Yiyan, CHEN Shaoxiong, ZHAO Guofan. An experimental study on the seismic behavior of reinforced concrete column strengthened with bonded steel hoops and carbon fiber reinforced polymer sheet [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5):10.
- [13] Xiao Y, Wu H, Matin G R. Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 1357.
- [14] 吴刚,吕志涛,蒋剑彪.碳纤维布加固钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[J].建筑结构,2002,32(10):42.
WU Gang, LV Zhitao, JIANG Jianbiao. Experimental study on the seismic behavior of RC columns strengthened with carbon fiber sheet [J]. Building Structure,2002,32(10):42.
- [15] Sim Jongsung, Park Cheolwoo, Do Youngmoon. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. J Simetal Composites,2005,36(B):504.
- [16] 吴刚,魏洋,吴智深,等.玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究[J].工业建筑,2007,37(6):14.
WU Gang, WEI Yang, WU Zhishen, et al. Comparative study on seismic performance of rectangular concrete columns strengthened with BFRP and CFRP composites [J]. Industrial Construction,2007,37(6):14.
- [17] 吴刚,顾冬生,吴智深,等.玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆形柱抗震性能比较研究[J].工业建筑,2007,37(6):19.
WU Gang, GU Dongsheng, WU Zhishen, et al. Comparative study on seismic performance of circle concrete columns strengthened with BFRP and CFRP composites [J]. Industrial Construction,2007,37(6):19.
- [18] 欧阳煜,张云超,李翔.玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪试验研究[J].工业建筑,2009,39(1):134.
OUYANG Yu, ZHANG Yunchao, LI Xiang. The research on shear capacity of RC beams strengthened with BFRP sheets [J]. Industrial Construction,2009,39(1):134.
- [19] 程莉.玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能试验研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.
CHENG Li. Investigation of BFRP-reinforced pre-damaged concrete beam-column joints under reversed cyclic loading [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2008.